

叶型甩油盘雾化特性研究*

覃文隆, 樊未军, 石 强, 徐汉卿, 张荣春

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要: 为提高甩油盘雾化质量, 采用试验研究方法, 对一种叶型甩油盘三个出口的液雾特性分别进行了研究, 并与圆出孔甩油盘进行对比。研究表明, 转速增加, 液雾SMD(索太尔平均直径)减小, 浓度变大; 流量增加, 液雾浓度变大, 圆出孔甩油盘液雾SMD变大, 叶型甩油盘液雾SMD变化不规律。甩油盘液雾SMD与浓度整体上呈反比, SMD大的地方浓度小, SMD小的地方浓度大。液雾SMD随径向距离增加先减小后增大, 转速大于12kr/min后, SMD最小点距出口径向距离约20mm。相同流量、转速下, 圆出孔甩油盘液雾SMD更小, 但叶型甩油盘液雾均匀性更好, 轴向分布范围更广。在叶型甩油盘出口后开槽可以显著减小液雾SMD, 锯齿型出口可以增加液雾浓度及减小低转速下液雾SMD。

关键词: 甩油盘; 旋转雾化; 液雾分布; 多普勒相位分析仪

中图分类号: V231.2+3; TK16 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2019) 10-2270-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180757

Investigation on Atomization Characteristics of Slinger with Blades

TAN Wen-long, FAN Wen-jun, SHI Qiang, XU Han-qin, ZHANG Rong-chun

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve the atomization quality of slinger, the atomization characteristics of a blade slinger with three different outlets was studied by experimental research methods, and compared with the slinger with only one round hole. The research shows that the spray SMD (Sauter mean diameter) becomes smaller and the concentration decreases as rotating speed increases. When flowrate increases, the spray concentration increases, the slinger with one round hole's spray SMD become larger but the blade slinger's spray SMD changes irregularly. The spray SMD is inversely proportional to the concentration as a whole, where the SMD is smaller, the concentration is larger; where the SMD is larger, the concentration is smaller. The spray SMD first becomes smaller then becomes larger with the increase of radial distance. When the rotating speed is greater than 12kr/min, the minimum SMD point is about 20mm away from the outlet in radial distance. Under the same flowrate and rotating speed, the slinger with one round hole's spray SMD is smaller, but the blade slinger's spray has better uniformity and a wider axial distribution range. Slotting after the outlet of blade slinger can significantly reduce the spray SMD; the zigzag outlet can increase the spray concentration and reduce the spray SMD when the rotating speed is low.

Key words: Slinger; Rotating atomization; Spray distribution; PDPA

* 收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金 (51506003)。

作者简介: 覃文隆, 博士生, 研究领域为机械旋转雾化。E-mail: dragon_tandy@126.com

通讯作者: 张荣春, 博士, 讲师, 研究领域为航空发动机燃烧室燃烧。E-mail: zhangrongchun@buaa.edu.cn

引用格式: 覃文隆, 樊未军, 石 强, 等. 叶型甩油盘雾化特性研究[J]. 推进技术, 2019, 40(10):2270-2278. (TAN Wen-long, FAN Wen-jun, SHI Qiang, et al. Investigation on Atomization Characteristics of Slinger with Blades[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10):2270-2278.)

1 引言

甩油盘是一种旋转雾化器,具有结构简单、重量轻、流量上限高等优点^[1],主要应用在中小型航空发动机的燃烧室中^[2-5]。甩油盘的构型、直径,出孔的形状、大小、长度、数量、布局等均会对其液雾特性产生影响,进而影响到燃烧室的设计与气流分配。甩油盘的液雾特性主要包括液雾 *SMD* 大小、浓度及在空间各点的分布,学者们对此进行了大量研究。

Morishita 对多种结构甩油盘进行了试验研究^[2],结果表明,旋转圆盘型甩油盘液雾 *SMD* 小于出孔型甩油盘,甩油盘的液雾 *SMD* 大致与甩油盘边缘线速度的 -0.7 次方成正比。Dahm 等对不同出孔形状、大小的甩油盘雾化特性进行了研究^[4-6],认为甩油盘出孔内液体分为薄膜与液流两种形态,出孔外液体破碎方式又分为次临界与超临界两种破碎模式。根据液体在外壁面的延伸情况,又分为规则与不规则两种模式。其中,液膜形态、超临界破碎、规则模式的液雾 *SMD* 更小,液滴尺寸分布更加均匀。作者还对圆形、方形、长槽形出孔进行了研究,认为液体会聚集于出孔曲率最小处,增大出孔直径,有利于雾化。Sescu 等对甩油盘雾化性能进行了数值模拟及试验研究^[7-10],认为液雾 *SMD* 随甩油盘转速增加而减小,流量增加而增大;液体破碎距离随流量增加而增大,转速而减小;液雾液滴直径分布范围随流量增加而增大,转速增加而减小。增大出孔直径,可以减小液雾 *SMD*。Choi 等通过一系列试验,对实际应用于小型燃气轮机的甩油盘进行了研究^[3,11-14]。结果表明,在甩油盘轴向方向上,液雾 *SMD* 变化不大,但液滴速度变化很大,轴向距离越大,液滴速度越小。当甩油盘位于与轴向平行的气流中时,气流速度小于 50m/s ,液雾 *SMD* 主要受甩油盘转速影响;气流速度大于 100m/s 时,甩油盘转速对液雾 *SMD* 影响不再明显。Paquet 等对前人的研究成果进行了总结^[15],认为在低转速下,旋转圆盘液雾 *SMD* 小于出孔型甩油盘;超高转速下,孔型甩油盘液雾 *SMD* 显著小于旋转圆盘。

国内学者对甩油盘也做了相应研究。1995年,贾永忠^[16]利用振动频谱分析方法,得出甩油盘雾化 *SMD* 公式。2003年,曾川等^[17]设计了甩油盘环形折流燃烧室并进行了点火试验,得到了良好的试验结果。2007年,宋双文等^[18]对甩油盘折流环形燃烧室进行了性能试验,研究了不同转速下燃烧室的总压恢复系数、出口温度分布不均匀系数(OTDF)、燃烧效率等性能。2012年,熊纯等^[19]测量了一种甩油盘的

雾化性能,得出随着甩油盘转速增大,其雾化锥角变小,液雾 *SMD* 变小;当甩油盘转速大于 $2.5 \times 10^4 \text{r/min}$ 时,燃油雾化 *SMD* 基本保持不变。

针对甩油盘构型对液雾特性的影响,参照应用于工业干燥流程叶片旋转盘^[20],设计了一种叶型甩油盘,对其液雾 *SMD*、浓度的空间分布规律等雾化特性进行了试验研究,并选择传统圆孔甩油盘作为参照,比较二者雾化性能的优劣。

2 试验系统

2.1 试验装置

图1为试验装置示意图。试验台电机固定在支架之上,由调节器控制转速,调节范围为 $0 \sim 24\text{kr/min}$,最小调节单位为 6r/min 。试验件垂直安装于电机轴上,外围安装有透明保护罩用来收集试验件甩出的液体。保护罩底部开有出液孔,液体从此处流入储液桶。储液桶中液体经过滤器、回流水泵、阀门、质量流量计,重新从喷管喷射到试验件,实现循环利用。其中,回流水泵可以在阀门关闭情况下实现液体自动回流,避免水泵烧坏;阀门为微调阀门,可以精确调节流量;质量流量计量程为 $0 \sim 40\text{g/s}$,最小测量单位为 0.1g/s 。试验测量系统主要由高速摄影仪与多普勒相位分析仪(PDPA)组成。高速摄影仪主要用于拍摄试验件出口处液体的形态,PDPA用于测量试验件所产生液雾的粒径分布。

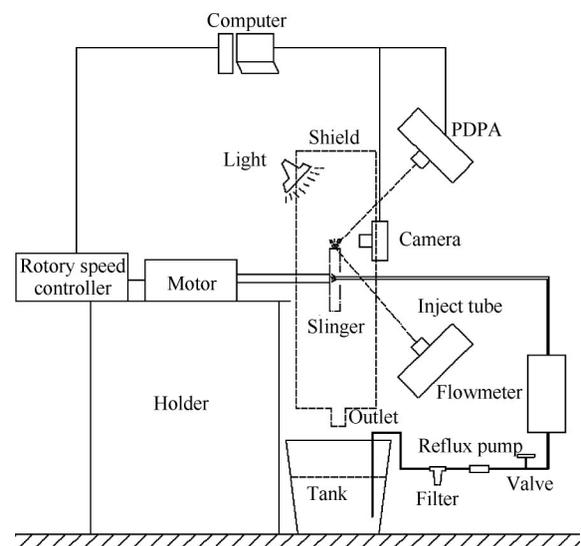


Fig. 1 Schematic of test device

图2为试验件示意图,图中A为普通出口,出口B在出口A基础上,在出口后侧开一道槽,以阻断液体在试验件外表面延伸。出口C在出口B的基础上,将

叶片出口边缘加工成锯齿状,用于引导叶片表面液体流动。

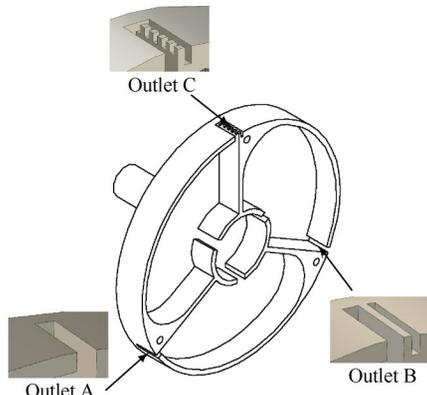


Fig. 2 Schematic of slinger with blades

图3为喷管示意图,液体从喷管顶部三个径向缝隙中喷出,避免液体直接从喷管顶部喷出,打在试验件侧壁面,而使得液体过度集中于试验件侧壁面,在出口处不能轴向均匀分布。液体通过喷管从试验件中心入射,经过试验件内环缝隙,流到叶片表面,之后随试验件旋转加速,顺着叶片从出口缝隙甩出。试验时,封堵试验件内环两个缝隙,使液体只流向指定的叶片,可以对三个出口分别进行研究。

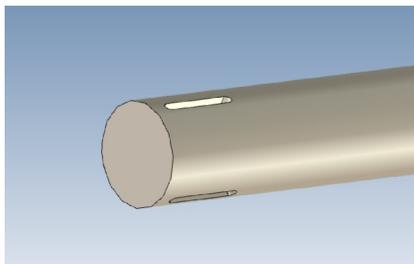


Fig. 3 Schematic of inject tube

图4为对照试验件结构示意图,试验件为传统孔型甩油盘,出口为圆形。液体通过喷管打在试验件侧壁面,旋转加速后,从出孔甩出。试验件只有一个出孔,防止多个出孔互相干扰。

2.2 试验参数

图2中,试验件外径为100mm,叶片轴向宽度分为10mm。A,B,C三个出口缝隙宽度均为2mm,出口B,C的槽距出口1mm,槽深2mm,宽1mm,轴向长度与叶片宽度相同;出口C锯齿宽度、深度均为1mm。图3中,喷管直径为10mm,出孔缝隙长度为8mm,宽度为1mm,数量为3个。图4中,试验件外径为100mm,与图2中试验件相同;出孔为圆形,直径3mm,孔长3mm。

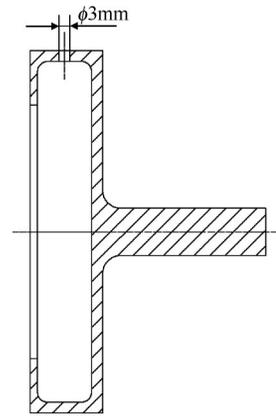


Fig. 4 Schematic of slinger with one orifice

在孔型甩油盘中,液体沿出孔圆周甩出;在叶型甩油盘中,液体沿叶片甩出。直径为3mm的圆孔,周长为9.42mm,与10mm宽的叶型甩油盘叶片宽度相近,可以用来对比研究在同样湿周长度下,出口形状对雾化的影响。

图5为PDPA测点示意图。选过试验件轴线的—个平面作为XY面,试验件圆周与平面的相交线作为X轴,相交线的中点作为原点,原点到试验件轴线的垂线作为Y轴,X轴与Y轴方向及测点位置如图5所示,测点序号为1~7。试验将测量这些位置的液雾特性,大致描绘出整个雾化场的液滴分布情况。试验件转速为0~24kr/min,流量为0~27g/s。

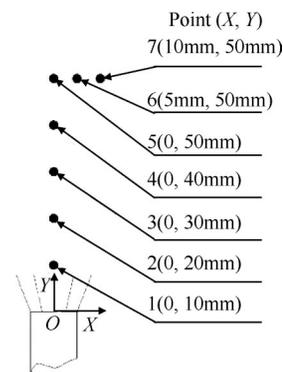


Fig. 5 Schematic of test points

3 结果分析

3.1 出口液体形态

图6为高速摄影拍摄的叶型甩油盘各个出口的液体形态相片,流量为3g/s,试验件向逆时针方向旋转。可以看到,在转速不大于1.2kr/min时,出口A中部分液体离开出口后,会先在甩油盘外壁面向后延伸一段距离,之后脱离甩油盘。转速大于1.5kr/min后,液体直接从出口A甩离,不再沿外壁面延伸。出

口 B 中,由于出口后开槽阻断了液体在外壁面延伸,只有在转速为 0.72kr/min 时,槽后外壁面上略有液体延伸;转速大于 0.96kr/min 后,外壁面无液体延伸,液体直接甩离甩油盘。出口 C 中现象与出口 B 中类似,在转速 0.72kr/min 时,液体在槽后外壁面略有延伸,延伸的液体数量比出口 B 略多。转速大于 0.96kr/min 后,液体不再延伸。

图 7 为更高转速下三个出口的液体形态图。出口 A 与出口 B 液体形态类似,当转速大于 1.5kr/min 时,液体出口形成液膜,液膜两侧靠近甩油盘侧壁面的液体较多,形成两股明显的液柱。随转速增加,液膜中间的部分越来越小,直至转速达到 3.6kr/min 时,

不再形成明显液膜,液体主要集中于出口两侧,形成多股液柱甩出。转速进一步增加,液柱长度变短,当转速大于 6kr/min 后,出口中间液柱数量明显增多,当转速大于 9kr/min 后,液体基本沿出口均匀分布,不再明显聚集于两侧。出口 C 中液体只有在 1.5kr/min 时在出口附近形成完整液膜,转速大于 1.5kr/min 后,液体主要集中于出口两侧,形成两股大液柱,同时出口中间有多股小液柱。转速达到 3.6kr/min 后,中间液柱数量大大减少,液体基本从出口两侧甩出。转速达到 6kr/min 后,中间液体数量开始增多,9kr/min 后液体基本沿出口均匀分布,形成多股液柱甩出。

液体分布主要集中于出口两侧,原因是叶片两

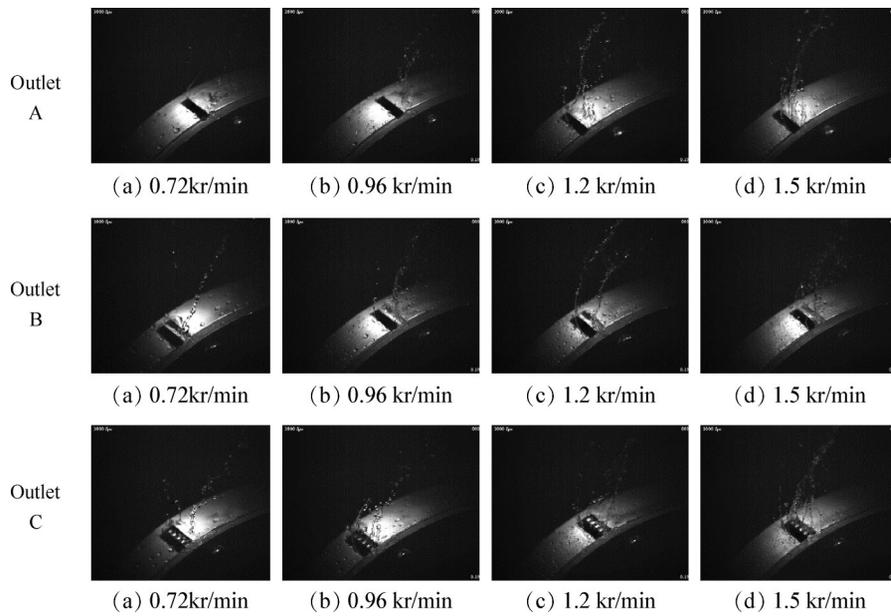


Fig. 6 Pictures of outlet A, B, C at low rotating speed

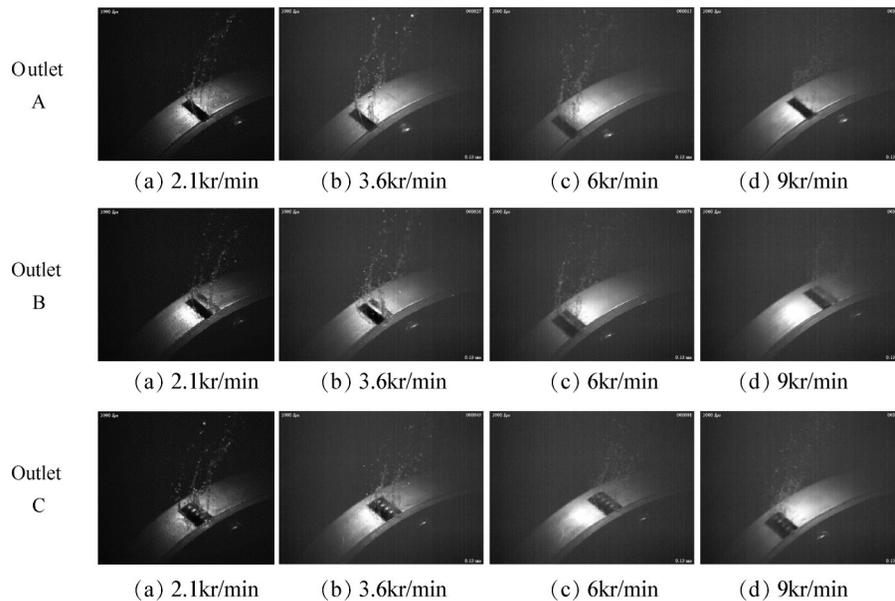


Fig. 7 Pictures of outlet A, B, C at high rotating speed

侧与甩油盘侧壁面相连,形成两个直角。液体由于表面张力作用,会向曲率小的地方聚集,因此会聚集于出口两侧。液体会在叶片表面形成液膜,液膜厚度随转速增加而减小,当转速增大到一定程度时(3.6kr/min),叶片表面无法再形成稳定液膜,因此出口A、B附近的液膜消失。出口C由于锯齿端有大量曲率很小的尖角,可以一定程度上聚集液体,只有叶片表面液膜厚度足够时才能形成液膜(1.5kr/min),同时可以使液体沿出口布分布更加均匀,并形成更多数量的液柱。

3.2 液雾特性

PDPA利用激光干涉原理,可以测量得到通过某点的所有液滴的直径、运动速度及方向。对所有液滴数据进行分析,可得到测点位置的液雾SMD、浓度、R-R(Rosin-Rammler)分布指数等参数。其中,SMD由式(1)计算得到

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (1)$$

式中 d_{32} 表示SMD, N 为测量得到的液滴数量, d_i 为各个液滴的直径。液雾浓度用单位时间通过测点的液滴数量衡量,由式(2)计算得到

$$N_t = \frac{N}{t} \quad (2)$$

式中 t 为测量时间。

R-R分布常用来描述液体雾化后液滴的分布规律。R-R分布如式(3)所示

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n} \quad (3)$$

式中 R 为液雾中小于直径 d 的所有液滴的体积分数, d_0 为特征直径,表示液雾中小于此直径的液滴体积分数为63.2%, n 为液雾分布指数, n 越大,表示液滴分布范围越集中,液雾均匀性越好。

对式(3)等号两边进行两次自然对数计算,得到式(4)。式(4)为以 d 为自变量, $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right)$ 为因变量的线性函数,根据PDPA测量得到的液滴数据,进行线性拟合,即可算出R-R分布指数 n 。

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right) = n \ln d - n \ln d_0 \quad (4)$$

3.2.1 液雾分布特性

液雾特性主要在甩油盘径向、轴向两个方向变化,即图5中 Y 轴与 X 轴方向,图中1~5测点用于研究液雾特性在甩油盘径向上的变化规律。理论上,

液雾分布应关于 Y 轴对称,高速摄影拍摄的出口液体形态也印证了这一点(图6,图7),因此只在 Y 轴一侧选取测点5~7来研究液雾特性在甩油盘轴向上的变化规律。

3.2.1.1 液雾径向分布规律

图8为流量为3g/s时,出口A在不同转速下液雾SMD、浓度在径向上的变化曲线图。可以看到,液雾SMD整体上随转速增加而减小,浓度 N_t 随转速增加而增大。当转速为3kr/min,6kr/min时,液雾SMD随径向距离增加而增大;转速为12kr/min,24kr/min时,SMD先随径向距离增加而减小,在 $Y=20\text{mm}$ 时达到最小,之后再随径向距离增加而增大。液雾浓度 N_t 整体上与液雾SMD呈反比,SMD小的地方浓度大,SMD大的地方浓度小,SMD最小点的液雾浓度最大。

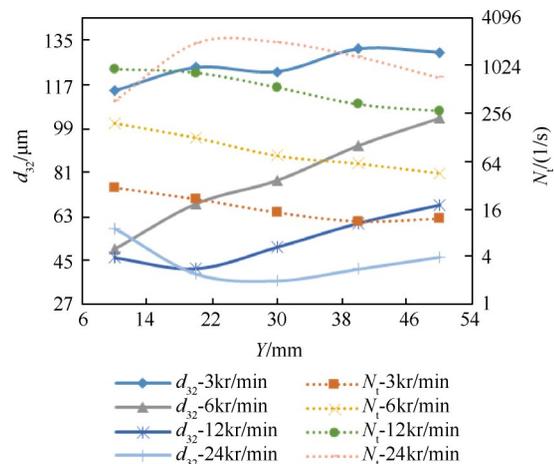


Fig. 8 Spray SMD/concentration radial distribution curves of outlet A at different rotating speed

液体从出口甩出后,先在空气剪切力作用下进行破碎,在一定时间后破碎到最小直径,之后又会相互碰撞融合,形成更大的液滴,因此在径向方向上,液雾SMD呈现先变小后变大的规律。液雾SMD最小点的径向距离与液体离开出口的径向速度及破碎时间有关。在3kr/min,6kr/min时,液雾SMD最小处应该出现在 $Y<10\text{mm}$ 的地方,因此在 $Y=10\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 之间随径向距离增加而增大;在12kr/min,24kr/min时,由于转速增加,液体离开出口时的径向速度变大,液雾SMD最小点外移至 $Y=20\text{mm}$ 处。虽然转速24kr/min的出口液体径向速度大于12kr/min,但转速增加,液滴受到的剪切力加大,破碎时间变短,综合影响,二者液雾SMD最小点径向位置接近。

图9为转速3kr/min时,出口A的液雾SMD、浓度

在不同流量下径向分布曲线图。液雾SMD整体上随径向距离增加而增大,浓度随径向距离增加而减小,与图8中得到的结论对应。当流量在3g/s~15g/s时,流量增加,液雾SMD没有明显变化趋势,某些径向位置的液雾SMD大小出现波动,但波动范围不大。液雾浓度随流量增加而增大。

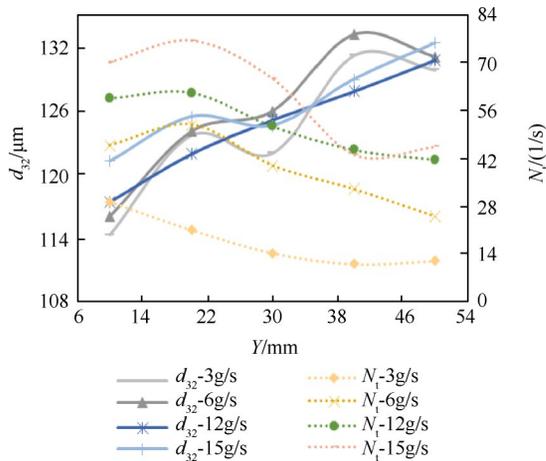


Fig. 9 Spray SMD/concentration radial distribution curves of outlet A at different flowrate

用相同的方法,对出口B与出口C进行分析,其液雾SMD与浓度在径向上分布规律与出口A相同。因此可以总结,叶型甩油盘液雾SMD整体上随转速增加而减小,浓度随转速增加而增大。当径向距离增加时,液雾SMD先减小后增大,当转速小于6kr/min时,SMD最小点距出口径向距离小于10mm;当转速大于12kr/min后,SMD最小点约在Y=20mm附近。液雾浓度大致随径向距离增加而减小,并与液雾SMD呈反比,即SMD大的地方浓度小,SMD小的浓度大。

3.2.1.2 液雾轴向分布规律

图10、图11为流量3g/s时,出口A和出口C在不同转速下液雾SMD、浓度在甩油盘轴向方向上的变化曲线图。转速为3kr/min,6kr/min时,出口A液雾SMD随轴向距离增加而减小;转速为12kr/min,24kr/min时,SMD随轴向距离增加而增大。出口C液雾SMD在所有转速下均随轴向距离增大而增大。液雾浓度的变化规律与SMD不同,出口A的液雾浓度在所有转速下均随轴向距离增加而减小,出口C的液雾浓度在转速3kr/min,6kr/min时随轴向距离增大先增加后减小,12kr/min,24kr/min时随轴向距离增加而减小。出口B的液雾分布特性与出口A一致。

由图6、图7知道,当转速小于6kr/min时,出口A,B,C的液体主要集中于出口两侧,出口C液体比A,B

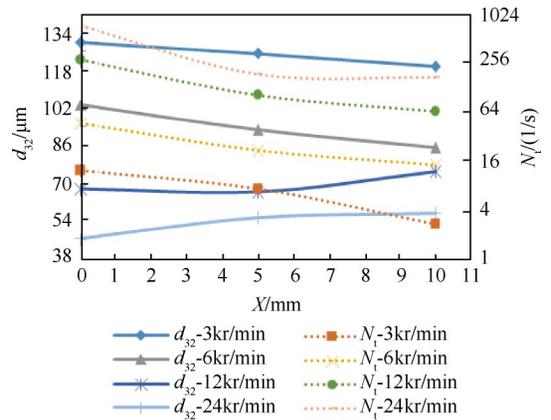


Fig. 10 Spray SMD/concentration axial distribution curves of outlet A at different rotating speed

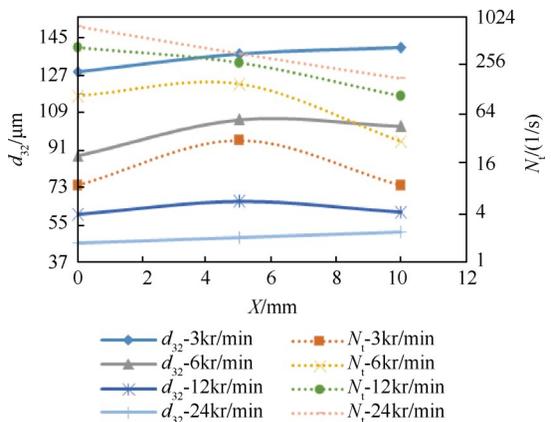


Fig. 11 Spray SMD/concentration axial distribution curves of outlet C at different rotating speed

沿轴向分布更加均匀。流量在12kr/min~24kr/min时三个出口液体基本沿轴向均匀分布。结合图10、图11可知,当液体沿出口轴向均匀分布时,液雾SMD随轴向距离增加而增大,浓度随轴向距离增加而减小。当液体主要分布于出口两侧时,液雾分布特性改变,出口A,B主要改变液雾SMD分布,出口C主要改变液雾浓度分布。

图12为转速3kr/min时,出口C在不同流量下液雾SMD、浓度在轴向上变化曲线。液雾浓度随流量增加而明显增加,并随轴向距离增加,增加幅度逐渐减小。轴向各点的液雾SMD随流量增加,变化并不规律,X=0点的SMD随流量增加而减小,X=5mm点的SMD随流量增加而增大,而X=10mm点的SMD随流量增加先增大后减小。出口A,B液雾轴向特性随流量变化同样不规律。

在一定流量范围内(3g/s~15g/s),由于叶型甩油盘叶片轴向长度足够,流量增加,液体优先改变在出口轴向的分布,径向速度改变不大,因此增加流量,

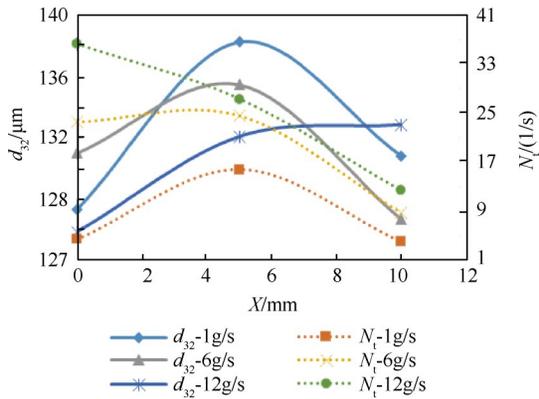


Fig. 12 Spray SMD/concentration axial distribution curves of outlet C at different flowrate

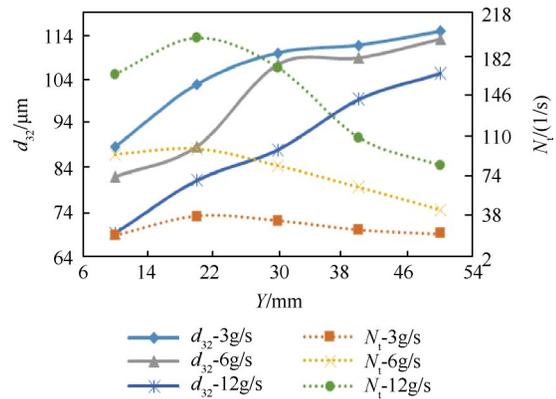


Fig. 14 Spray SMD/concentration radial distribution curves of circle outlet at different flowrate

叶型甩油盘液雾 SMD 在径向、轴向上变化并不规律。流量增加,液雾 SMD 没有明显变化情况下,液滴数量明显增加,因此叶型甩油盘液雾浓度随流量增加而增加。

3.2.1.3 圆出孔液雾分布特性

图 13 为流量为 3g/s 时,圆出孔甩油盘(图 4)的液雾 SMD、浓度在不同转速下沿径向分布曲线图。图 14 为转速为 3kr/min 时,圆出孔甩油盘的液雾 SMD、浓度在不同流量下沿径向分布曲线图。从图 13 看到,圆出孔的液雾 SMD 整体上随径向距离的增加先减小后增大,当转速达到 6kr/min 时,圆出孔的液雾 SMD 最小点外移至 Y=20mm 附近,而出口 A, B, C 液雾 SMD 在转速 12kr/min 时才外移至 Y=20mm。圆出孔各个转速下液雾浓度均在 Y=20mm 处达到最大,之后随径向距离增加而减小。从图 14 看到,圆出孔液雾 SMD、浓度同随流量增加而增大,浓度数值与流量约成正比,即流量增加 2 倍,相同测点浓度增加 2 倍。而叶型甩油盘液雾 SMD 随流量变化不明显,浓度虽然随流量增加而增大,但并未表现出明显的等比关系。

图 15 为流量 3g/s 时,圆出孔液雾在不同转速下液雾 SMD、浓度在轴向上变化曲线图。在 X=0~10mm 区间,液雾 SMD 随 X 增加而增大,浓度随 X 增加而减小。随着转速增加,浓度曲线斜率越来越大,说明转速越高,液雾在轴向上越向 X=0 处集中。

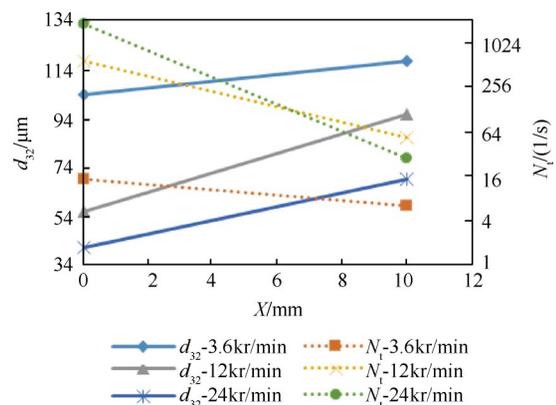


Fig. 15 Spray SMD/concentration axial distribution curves of circle outlet at different rotating speed

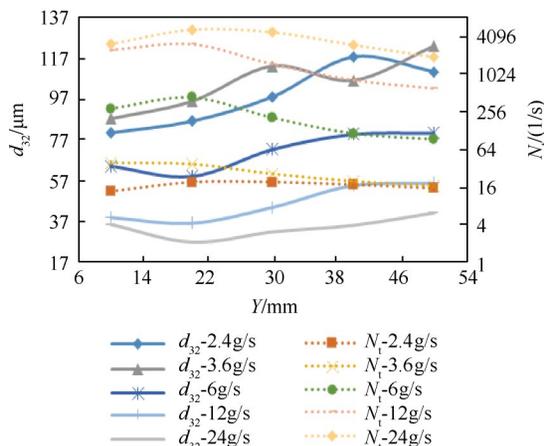


Fig. 13 Spray SMD/concentration radial distribution curves of circle outlet at different rotating speed

图 16 为出口 A, B, C 及圆出孔在流量为 3g/s、转速为 12kr/min 时,液雾特性轴向分布曲线图。四个出口液雾 SMD 整体上随 X 增加而增大,浓度随 X 增加而减小。圆出口液雾浓度斜率最大,说明在轴向上,圆形出口的液雾最集中。出口 A, B, C 液雾浓度斜率相差不大,三者液雾浓度轴向分布均匀性类似。出口 C 的浓度整体上大于相同条件下的出口 A 和 B,说明锯齿型出口可以增加破碎液滴数量,高速摄影相片中出口 C 处液体形成的液柱数量更多也证明这一点。

圆形出口与叶型甩油盘出口主要区别是,叶型甩油盘出口在轴线方向上长 10mm,而圆形出孔只有 3mm,且呈曲线。当转速增加时,叶型甩油盘出口液体径向速度增加的同时,轴向分布也变得更加均匀,从图 7 可以看到这一点。而圆出孔中液体只能更加集

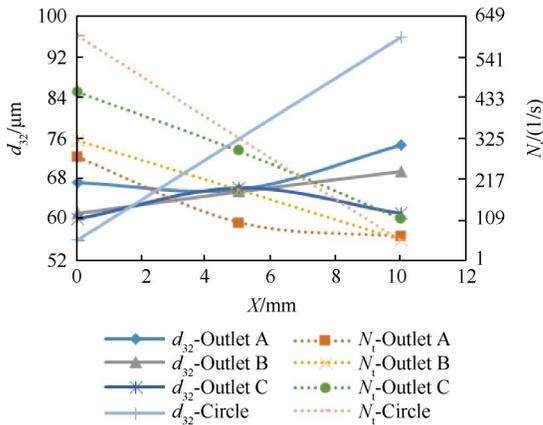


Fig. 16 Spray SMD/concentration axial distribution curves of outlet A,B,C and circle

中于出孔一侧的曲型中,因此圆形出孔中液体径向速度增加程度远大于叶型甩油盘,所以在转速 6kr/min 时,圆出孔的液雾 SMD 最小点已外移至 Y=2mm(图 13)。同理,当流量增加时,圆出孔中液体形成的初始液柱直径增加程度远大于叶型甩油盘出口,因此流量增加,圆出孔液雾 SMD 明显变大(图 14),而叶型甩油盘液雾 SMD 变化不规律(图 9、图 12)。同时可以知道,圆出孔的液雾分布在轴线方向上更加集中,叶型甩油盘出口液雾轴向分布更加宽广(图 16)。

3.2.2 雾化效果对比

由前面研究知道,转速是影响出口 A, B, C 和圆出孔液雾特性的主要因素,流量对叶型甩油盘液雾影响不规律,因此主要对比相同流量下,四个出口液雾特性随转速变化规律。由前面研究知道,液雾主要集中于 X=0 线, SMD 最小点最多出现在测点 2 附近。另小型甩油盘燃烧室主燃烧区在离轴线 100mm 附近^[12],因此选择测点 2,5 的液雾特性作为主要研究对象。

图 17、图 18 分别为测点 2,5 处四个出口液雾特性随转速变化曲线图,流量为 3g/s。可以看到,圆出口液雾 SMD 整体上小于其它出口,转速高时更加明显。出口 A 液雾 SMD 最大,出口 B, C 液雾 SMD 接近,证明在出口后开槽可以有效减小液雾 SMD。圆出口浓度最大,出口 A 浓度最小,出口 B, C 浓度接近。在测点 2 处,低转速(3kr/min)时出口 C 液雾 SMD 明显小于出口 A 和 B,表明锯齿型出口可以改善叶型甩油盘低速下雾化性能。当转速小于 10kr/min 时,液雾 SMD 曲线随转速增加急剧下降,浓度曲线急剧上升;当转速大于 10kr/min 后, SMD 及浓度曲线变化缓和很多,说明转速小于 10kr/min 时,增加转速可以明显改善雾化质量;转速大于 10kr/min 后,增加转速对雾化的改

善作用下降很多。

图 19 为流量为 3g/s 时,测点 2,5 的液雾 R-R 分布指数 n 随转速变化曲线图。n 越大,表明液雾越均匀。由图可知,圆出口的 n 值明显小于其它出口,说明圆形出口的液雾均匀性比叶型甩油盘差。圆出口与出口 C 的 n 值整体上随转速增加而升高,说明增加转速,可以增加二者液雾均匀性。出口 A, B 曲线变化不规律,但整体上高于圆出口。

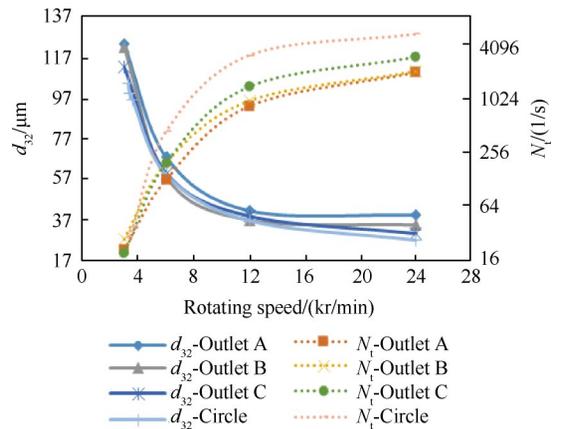


Fig. 17 Spray SMD/concentration-rotating speed relation curves of outlet A,B,C,circle at test point 2

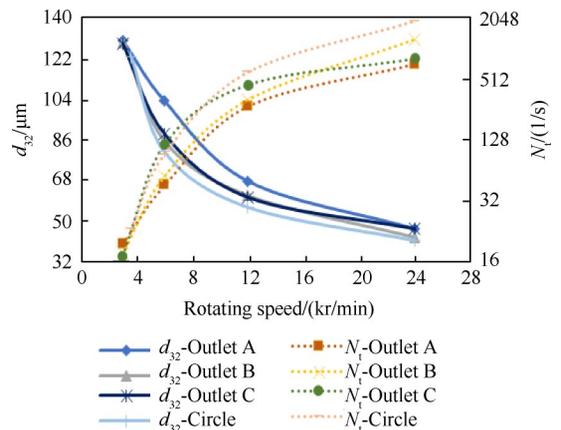


Fig. 18 Spray SMD/concentration-rotating speed relation curves of outlet A,B,C,circle at test point 5

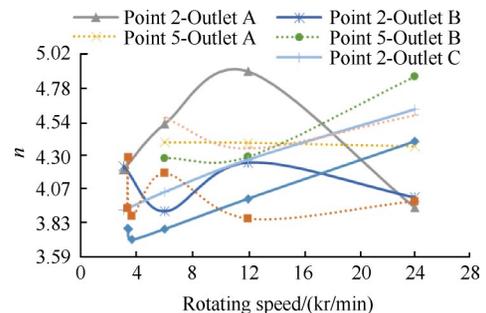


Fig. 19 R-R distribution index n-rotating speed relation curves of outlet A,B,C,circle at point 2,5

4 结 论

对叶型甩油盘三种出口的液体形态及雾化特性进行了试验研究,并与传统圆形出口甩油盘进行对比,得到以下结论:

(1)在低转速下,叶型甩油盘液体主要从出口两侧甩出(小于6kr/min);转速增加,出口中间液体逐渐增多,直至达到9kr/min后,液体基本沿出口均匀分布。

(2)在出口后开槽可以阻断低速下液体在甩油盘外壁面的延伸;锯齿型出口可以提高出口液体分布的均匀性。

(3)叶型与圆孔甩油盘的液雾SMD均沿径向距离的增加先减小后增大,转速大于12kr/min(叶型甩油盘)或6kr/min(圆孔甩油盘)后,SMD最小点径向距离约为20mm。

(4)叶型甩油盘液雾轴向分布特性与液体在出口的形态有关,并且轴向分布范围比圆出孔甩油盘更广。

(5)液雾浓度分布与SMD分布呈反比,即SMD小的地方浓度大,SMD大的地方浓度小。

(6)叶型甩油盘液雾SMD随转速增加而减小,在一定范围内(3g/s~15g/s),流量增加,SMD没有明显变化规律。圆出孔甩油盘液雾SMD随转速增加而减小,流量增加而增加。二者液雾浓度均随转速、流量的增加而增加。

(7)在叶型甩油盘出口后开槽可以显著减小液雾SMD;锯齿型出口可以增加液雾浓度。

(8)相较圆出孔甩油盘,相同流量、转速下叶型甩油盘液雾SMD更大,但液雾浓度轴向分布范围更广,液雾R-R分布指数 n 更大,即液雾更加均匀。

致 谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献:

- [1] Lefebvre A. Fifty Years of Gas Turbine Fuel Injection [J]. *Atomization and Sprays*, 2000, 10(3-5): 251-276.
- [2] Morishita T. A Development of the Fuel Atomizing Device Utilizing High Rotational Speed[R]. *ASME 81-GT-180*.
- [3] Choi S M, Jang S H. Spray Behavior of the Rotary Atomizer with in-Line Injection Orifices[J]. *Atomization and Sprays*, 2010, 20(10): 863-875.
- [4] Dahm W J A, Patel P R, Lerg B H. Experimental Visualizations of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization[J]. *Atomization and Sprays*, 2006, 16(8): 933-944.
- [5] Werner D. Fundamental Analysis of Liquid Atomization by Fuel Slingers in Small Gas Turbines[R]. *AIAA 2002-3183*.
- [6] Dahm W J A, Patel P R, Lerg B H. Analysis of Liquid Breakup Regimes in Fuel Slinger Atomization[J]. *Atomization and Sprays*, 2006, 16(8): 945-962.
- [7] Sescu C, Kucinschi B R, Afjeh A A, et al. Experimental Test Rig with Results on Liquid Atomization by Slinger Injectors[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(11).
- [8] Carmen S, Bogdan K, Abdollah A. Computational Analysis of a Slinger Atomizer[R]. *AIAA 2010-6581*.
- [9] Sescu C, Kucinschi B R, Masiulaniec C K, et al. Experimental Test Rig with Results on Fuel Atomization by Slinger Injectors[R]. *AIAA 2008-4771*.
- [10] Sescu C, Kucinschi B R, Afjeh A A, et al. Parametric Study of Liquid Atomization by Slinger Injectors [R]. *AIAA 2009-4829*.
- [11] Choi H, Lee D, You G, et al. Spray Characteristics of the Rotary Atomizer for the Slinger Combustor[J]. *Journal of ILASS-Korea*, 2008, 13(3): 149-155.
- [12] Choi S M, Jang S H, Lee D H, et al. Spray Characteristics of the Rotating Fuel Injection System of a Micro-Jet Engine[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(2): 551-558.
- [13] Choi S M, Yun S, Jeong H J, et al. Spatial Drop Behavior of a Rotary Atomizer in a Cross Flow[J]. *Atomization and Sprays*, 2012, 22(12): 1077-1095.
- [14] Choi S M, Yun S, Jeong H J, et al. Spray in Cross Flow of a Rotary Atomizer[J]. *Atomization and Sprays*, 2012, 22(2): 143-161.
- [15] Paquet B, De Champlain A, Kalla S. Review of Fuel Spray Distributions to Predict Performance of Rotary Atomizers in a Slinger Gas Turbine Combustor[J]. *Atomization and Sprays*, 2016, 26(5).
- [16] 贾永忠. 甩油盘的雾化分析[J]. *推进技术*, 1995, 16(4): 45-49. (JIA Yong-zhong. An Analysis on Atomization of Fuel Slinger[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995, 16(4): 45-49.)
- [17] 曾 川, 王洪铭, 单 鹏. 微涡喷发动机离心甩油盘环形折流燃烧室的设计与实验研究[J]. *航空动力学报*, 2003, (1): 92-96.
- [18] 宋双文, 蒋荣伟, 陈 剑, 等. 离心甩油折流环形燃烧室的性能试验[J]. *航空动力学报*, 2007, (9): 1401-1404.
- [19] 熊 纯, 宋双文, 陈 剑, 等. 一种离心甩油盘雾化性能试验[J]. *航空动力学报*, 2012, (7): 1517-1522.
- [20] 于才渊. 喷雾干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.

(编辑:朱立影)